Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 13, No. 2, 2023, p. 213-226

Evaluation of the Effects of Artificial Light on Some Plant Characteristics in the Design and Construction of a Small-scale Plant Factory

P. Shamsi Roodbarsar[1], S. R. Mousavi Seyedi[2*], D. Kalantari[2], K. Ghasemi[3]

1- MSc. Graduated, Mechanics of Biosystem Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

2- Associate Professor, Mechanics of Biosystem Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

3- Assistant Professor, Horticultural Sciences Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

(*- Corresponding Author Email: mousavi22@sanru.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jam.2022.73522.1070

Received: 12 November 2021
Revised: 11 February 2022
Accepted: 19 February 2022
Available Online: 19 February 2022

How to cite this article:
Shamsi Roodbarsar, P., Mousavi Seyedi, S. R., Kalantari, D., & Ghasemi, K. (2023). Evaluation of the Effects of Artificial Light on Some Plant Characteristics in the Design and Construction of a Small-scale Plant Factory. *Journal of Agricultural Machinery*, *13*(2), 213-226. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2022.73522.1070

Introduction

It is predicted that the world population will grow to 9.3 billion by 2050 and the urban population will increase by 73%, growing from 3.6 billion to 6.3 billion. This huge population requires abundant food production. A plant factory with artificial light (PFAL) is a closed growing system that is insulated against heat and air. The plants grow on shelves under horizontal artificial lighting. The main goal of PFAL is commercial plant production, but mini PFALs do not have commercial goals and are used to produce plants in small domestic sizes. Plants that are less than 30 cm tall, and grow well in relatively low light conditions and at high planting densities, are suitable for the plant factory. Therefore, plants such as rice, wheat, and potatoes are not suitable for cultivation in a plant factory.

The main purpose of this research is to study the proper light quality for growing radish plants. All light treatments had a significant effect on biomass, sugar, and photosynthetic pigments of radish. The results showed that the highest amount of chlorophyll a was 0.964 mg g^{-1} fresh leaf weight and the lowest amount was 0.318 mg g^{-1} fresh leaf weight. For chlorophyll b, the highest value was 0.666 mg g^{-1} wet weight and the lowest value was 0.229 mg g^{-1} wet weight. The highest and lowest carotenoid contents were 74.75 mg g^{-1} and 30.6 mg g^{-1} wet weight, respectively. The highest sugar content was 0.717 µg g^{-1} dry weight and the lowest was 0.02 µg g^{-1} dry weight. The highest fresh and dry weights of the plant were 0.27 g and 0.014 g, respectively, while the lowest values recorded were 0.155 g and 0.007 g, respectively. In this study, plant length was also examined, but no significant difference was observed between different light treatments. Based on these findings, it can be concluded that the light composition (R2, G0, B1) was the most suitable light regime for use in the designed system.

Materials and Methods

The plant studied in this investigation was radish. The place of growth was a vertically built system consisting of four floors, each divided into two sections. A controller was required in each section to regulate parameters such as light time, temperature, and moisture. The controllers were designed using Fritzing software and built with parts and sensors like DHT 11, Arduino UNO based on ATMEGA328P, Relay module Arduino, data logging shield, and driver module RC. A programming platform like Arduino was used to write codes for controlling the remaining parameters. This study tested seven different light treatments, plus sunlight as a control, to investigate their effects on radish growth. The light treatments were developed by adjusting the number of three different lights: red, green, and blue. LEDs were installed after designing and constructing the m-PFAL system. Based on previous research conducted in this field, all LED lights were positioned above the shelves to ensure that the plants received an appropriate amount of light in a vertical orientation. Additionally, light reflectors were installed beside the plants to provide proper lighting for the lower leaves. The experimental design involved a completely randomized design with eight treatments and three replications, and all data

analysis was conducted through SAS software. The average comparison was performed using the Duncan method at a probability of 1% and 5%.

Results and Discussion

The results indicate that the light regime (R2, G0, B1) resulted in the highest amount of chlorophyll "a", which was significantly different from both the control and other treatments. The treatment with the lowest amount of chlorophyll "a" was (R1, G0, B0), which did not differ significantly from the control or (R1, G1, B1). The treatment with the highest amount of chlorophyll "b" was (R2, G0, B1), which differed significantly from the control but not from (R2, G1, B0) or (R1, G0, B2). Using a mixed light treatment of blue and red resulted in higher amounts of photosynthesis pigments, especially when the red light was more prevalent. The treatment with the highest wet weight was (R2, G0, B1), which did not differ significantly from natural light. The treatment with the lowest wet weight was the just red light treatment, which was much lower than the other treatments. The dry weight of the radish was 4-6 percent of its wet weight, and the treatment with the highest dry weight was (R2, G0, B1), which did not differ significantly from (R0, G1, B2) or (R1, G0, B0). The treatment with the highest amount of sugar was (R2, G0, B1), which was significantly higher than other optical regimes used and natural light. Because the production of carbohydrates and sugar is directly related to photosynthesis, it can be concluded that the state of photosynthesis was most proper in the (R2, G0, B1) treatment.

Conclusion

This study investigated the optimal light quality for the healthy and rapid growth of radish plants in a plant factory. LED lights can be an excellent alternative to natural light when there are limitations, such as in greenhouses or multi-floor plantings. The results show that the best light mixture was red and blue lights, with more red light than blue light, while the worst light regime was just red color, which had a negative effect on all parameters.

Keywords: Artificial light, Chlorophyll, Light regime, Plant factory, Urban agriculture

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۲، ص ۲۲٦-۲۱۳

ارزیابی اثرات نور مصنوعی بر برخی شاخص‌های گیاه در طراحی و ساخت یک کارخانه گیاهی مقیاس کوچک

پوریا شمسی رودبارسرا[۱]، سیدرضا موسوی سیدی[۲*]، داوود کلانتری[۲]، کامران قاسمی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

چکیده

تولید مواد غذایی در محیط شهری راهکار مناسبی برای به‌کارگیری فضاهای بلااستفاده می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش طراحی و ساخت یک کارخانه گیاهی مجهز به نور مصنوعی جهت استفاده در مناطق شهری می‌باشد. از آن‌جا که تامین نور مناسب از مهم‌ترین ویژگی‌های تاثیرگذار بر کارایی یک کارخانه گیاهی محسوب می‌شود، تعداد ۸ تیمار نوری (R=1، G=0، B=1)، (R=2، G=0، B=2)، (R=2, G=1, B=0)، (R=1, G=0, B=2)، (R=0, G=1, B=2)، (R=1, G=1, B=1)، (R=0, G=0, B=1)، (R=1, G=0, B=0) و نور خورشید به‌عنوان شاهد و در سه تکرار مورد آزمایش قرار گرفت. گیاه مورد استفاده تربچه با نام علمی *Raphanus sativus* بود که پس از ۵ هفته برداشت شد و پارامترهای مختلفی از قبیل کلروفیل، وزن تر و خشک، قند و طول گیاه اندازه‌گیری گردید. بیشترین میزان کلروفیل a ۰/۹۶۴ و کمترین مقدار آن ۰/۳۱۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ ثبت شد که به‌ترتیب برای تیمارهای (R2 ،G0 ،B1) و (R1, G0, B0) به‌دست آمد. بیشترین و کمترین مقدار کلروفیل b نیز به‌ترتیب مربوط به تیمار (R2, G0, B1) با مقدار ۰/۶۶۶ و تیمار (R1, G0, B0) با مقدار ۰/۲۲۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بود. بیشترین و کمترین مقدار کارتنوئید نیز به‌ترتیب مربوط به تیمار (R2, G1, B0) با مقدار ۷۴/۷۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ و تیمار (R1, G0, B0) با مقدار ۳۰/۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ بود. بیشترین میزان قند ۰/۷۱۷و کمترین مقدار آن ۰/۰۲ میکروگرم بر گرم وزن خشک برگ ثبت شد که به‌ترتیب برای تیمارهای (R2 ،G0 ،B1) و (R1, G0, B0) به‌دست آمد. همچنین بالاترین وزن تر و خشک گیاه مربوط به تیمار (R2, G0, B1) با مقادیر ۰/۲۷گرم و ۰/۰۱۴ گرم و کمترین آن مربوط به تیمار (R1, G0, B0) بود که به‌ترتیب ۰/۱۵۵و ۰/۰۰۷ گرم ثبت شدند. اما تیمارها بر طول گیاه تاثیر نداشتند و اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. نتایج نشان داد که ترکیب نوری (R2, G0, B1) مناسب‌ترین تیمار در سامانه طراحی شده بود.

واژه‌های کلیدی: رژیم نوری، کارخانه گیاهی، کشاورزی شهری، کلروفیل، نور مصنوعی

مقدمه

پیش‌بینی شده است که جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰ به ۹/۳ میلیارد نفر افزایش خواهد یافت و جمعیت شهری نیز از ۴۸ درصد فعلی به ۷۳ درصد خواهد رسید. این افزایش جمعیت، نیاز به محصولات غذایی را به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای افزایش خواهد داد. از سوی دیگر، با توجه به محدود بودن منابع طبیعی مانند آب و زمین و همچنین تغییرات اقلیمی، تولید محصولات کشاورزی با چالش‌های مختلفی روبه‌رو است. افزایش جمعیت و تغییرات اقلیمی با هم مرتبط بوده و ضروری است که بر اساس روش‌های مناسب و به‌صورت هم‌زمان چالش‌های ناشی از آن‌ها مدیریت شود (Kozai, 2012). با افزایش جمعیت شهری، مقادیر زیادی از منابع مانند غذا، آب، سوخت‌های فسیلی و غیره نیز به مناطق شهری آورده می‌شود که این امر موجب تولید مقادیر زیادی از زباله و آلوده شدن محیط‌زیست می‌گردد. به‌عنوان مثال انتقال محصولات کشاورزی و مواد غذایی به‌وسیله کامیون‌های معمولی به مناطق شهری، موجب انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از حمل و نقل شده که شدت انتشار آن بین مقدار ۰/۸ و ۱/۹ کیلوگرم دی‌اکسید کربن به ازای هر تن در کیلومتر برآورد شده است (Ohyama, Takagaki, & Kurasaka, 2008).

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۲- دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۳- استادیار، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mousavi22@sanru.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2022.73522.1070

هنگامی که گیاهان در مزارع آزاد کشت می‌شوند، کیفیت و عملکرد مواد غذایی تحت تاثیر شرایط آب و هوایی منطقه می‌باشد. بنابراین کیفیت آن‌ها همیشه در معرض خطر است. با توجه به این‌که شدت نور خورشید در طول روز و همچنین فصول مختلف متفاوت است، تولید گیاه در گلخانه نیز از لحاظ مصرف انرژی کارآمد نمی‌باشد زیرا شدت نور آن به‌طور دقیق قابل تنظیم شدن نیست. اما کارخانه گیاهی یک سیستم تولید پیشرفته است که در آن محیط رشد به‌صورت بهینه کنترل می‌شود (Kozai, Niu, & Takagaki, 2019).

کارخانه گیاهی با نور مصنوعی (PFAL[1])، به یک کارخانه تولید گیاه با ساختاری انبارگونه گفته می‌شود که نسبت به حرارت، عایق بوده و تقریبا غیرقابل نفوذ به‌وسیله هوا می‌باشد و درون آن قفسه‌های متعدد کشت با لامپ‌های الکتریکی به‌صورت عمودی روی هم قرار گرفته‌اند و به منظور تولید تجاری گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Kozai, 2013). اما مینی PFAL[2]ها دارای اهداف تجاری نبوده و بیشتر در زمینه کشاورزی خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Takagaki, Hara, & Kozai, 2014). در کارخانه گیاهی این امکان وجود دارد که محیط رشد گیاه به‌صورت دلخواه و دقیق کنترل شود. علاوه بر موارد ذکرشده، این امکان وجود دارد که آب حاصل از تعرق گیاه جمع‌آوری و برای آبیاری خود گیاه مورد استفاده قرار گیرد (Kozai *et al.*, 2019) با توجه به این‌که کارخانه گیاهی در برابر حرارت عایق بوده و همچنین هوا تقریبا غیرقابل نفوذ است بنابراین محیط کشت در کارخانه گیاهی تحت تاثیر آب و هوا و به‌ویژه نوسانات تابشی خورشید قرار نمی‌گیرد. به همین دلیل می‌توان محیط کشت کارخانه گیاهی را به‌طور دقیق و دلخواه کنترل کرد اما گلخانه‌ها و به‌ویژه مزارع باز تحت تاثیر موارد ذکر شده قرار می‌گیرند (Li *et al.*, 2012). گیاهانی مانند برنج، گندم و سیب‌زمینی که معمولا به‌عنوان منبع کالری مورد استفاده انسان و دام قرار می‌گیرند و گیاهانی که نیاز به مناطق وسیعی جهت پرورش دارند، مناسب تولید در کارخانه گیاهی نیستند. کارخانه گیاهی در ژاپن و کشورهای آسیایی جهت تولید سبزیجات، گیاهان دارویی و نشا مورد استفاده قرار گرفته است (Kozai, 2013). با توجه به این‌که یکی از مشکلات هر جامعه‌ای موضوع اشتغال‌زایی است، کارخانه گیاهی تا حدودی برای حل این مشکل مناسب است. بدین صورت که با ارائه‌ی آموزش‌هایی ساده به افراد جامعه، کارخانه گیاهی می‌تواند موجب ایجاد فرصت‌های شغلی برای سالمندان و معلولین با محیط کاری امن و دلپذیر شود و سبب تولید گیاهانی تازه و با کیفیت بالا گردد (Kozai *et al.*, 2019).

در تحقیقی (Ikeda *et al.*, 1991) به تولید کاهو با استفاده از لامپ‌های فلورسنت و تحت یک برنامه کشت سالانه پرداختند. در این آزمایش از ۱۶ ساعت روشنایی استفاده کردند به‌طوری‌که شدت نور در زمان روشنایی در محدوده $\mu E.m^{-2}.s^{-1}$ ۳۳۰-۵۶۰، دما ۰±۲۵/۵ درجه سانتی‌گراد و در دوره خاموشی نیز ۰±۲۰/۲ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. همچنین رطوبت برابر با ۵±۷۰ درصد، غلظت کربن دی‌اکسید ppm ۵۰±۹۰۰، سرعت جریان هوا ۰/۵ متر بر ثانیه، هدایت الکتریکی ms ۱/۳ و pH محلول غذایی برابر با ۵/۵ تنظیم شد. نتایج نشان داد که در شرایط فوق رشد کاهو افزایش یافت به‌طوری‌که وزن تازه گیاه در طی ۲۹ روز به ۷۵ گرم رسید. همچنین مصرف الکتریسیته برای روشنایی در طول دوره جوانه‌زنی گیاه و مصرف الکتریسیته کل به‌ترتیب برابر با ۱/۱ و ۲/۵ کیلووات‌ساعت گزارش شد که حدود ۵۰ و ۲۰ درصد کمتر از تجهیزات متعارف با استفاده از لامپ‌های سدیم فشار بالا بود. در پژوهشی (Kozai, 2007) در یک کارخانه گیاهی از روش نوردهی رو به بالا با استفاده از LEDهایی که روی پانل‌های کشت قرار گرفت تا انرژی نورانی بیشتری برای برگ‌های پایینی ایجاد شود، استفاده کردند. در کارخانه گیاهی، نور رو به بالا که توسط برگ‌های پایینی جذب نمی‌شود، توسط برگ‌های بالا جذب می‌شود و یا توسط بازتابنده نوری که در بالای تاج پوششی گیاه قرار می‌گیرد، به سمت جامعه گیاهی بازتاب می‌شود که از نوردهی بین محصولات مفیدتر می‌باشد در تحقیقی (Shimizu, Saito, Nakashima, Miyasaka, & Ohdoi, 2011) به توسعه یک دستگاه جدید بهینه شده با LED برای تولید سبزیجات در یک کارخانه گیاهی پرداختند که در آن هدف اصلی بررسی کیفیت نور موثر برای رشد سالم و سریع‌تر گیاهان بود. تاثیر کیفیت نور توسط ترکیبی از LEDها (آبی، سبز و قرمز) بر میزان فتوسنتز و رشد کاهو بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان فتوسنتز کاهو در نور مخلوط با LEDهای قرمز و آبی بیشتر است. طول ساقه در نور قرمز و آبی افزایش و در نور ترکیبی کاهش یافت. همچنین وزن تر کاهو در نور قرمز و فلورسنت افزایش یافت. در پژوهشی (Graamans, Baeza, Dobbelsteen, Tsafaras, & Stanghellini, 2018) با استفاده از منابع موجود در مورد تولید کاهو، عملکرد یک کارخانه گیاهی را با یک گلخانه سنتی برای سه منطقه جغرافیایی مختلف مقایسه کردند. با توجه به نتایج اعلام شده، از لحاظ بهره‌وری انرژی کارخانه گیاهی ($1411 MJkg^{-1}$) حتی از کارآمدترین گلخانه‌ها ($1699 MJkg^{-1}$) نیز بهتر عمل کرد. همچنین از لحاظ منابع مصرفی مانند آب و کربن‌دی‌اکسید نیز عملکرد بهتری از خود نشان داد. هدف از این پژوهش طراحی و ساخت یک کارخانه گیاهی و ارزیابی اثر رژیم‌های نوری مختلف بر برخی از ویژگی‌های محصول تولیدی در آن به‌منظور تولید مواد غذایی در محیط شهری بود. در این تحقیق از گیاه تربچه استفاده شد.

1- Plant factory with artificial lighting
2- Mini-PFAL

مواد و روش‌ها

طراحی و ساخت کارخانه گیاهی با استفاده از نرم‌افزار Solidworks برای طراحی محفظه رشد، نرم‌افزار Fritzing برای طراحی مدار الکترونیکی ارزیابی اثرات نور مصنوعی بر برخی شاخص‌های گیاه، کدنویسی در آردینیو برای راه‌اندازی کنترلر، ماژول رطوبت و دما، ماژول رله، ماژول درایور I2C، کنترلر و LEDها استفاده شد.

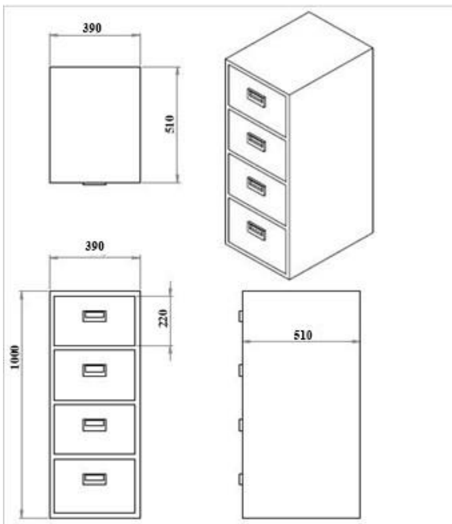
طراحی و ساخت محفظه رشد

محفظه رشد به‌صورت عمودی در ۴ طبقه ساخته شد و به‌منظور کاهش حجم محفظه، هر طبقه به دو بخش تقسیم گردید. برای طراحی فضای کشت از نرم‌افزار Solidworks استفاده شد. در شکل ۱، نمای سه‌بعدی و در شکل ۲، نمای دوبعدی محفظه رشد که در بخش Drawing طراحی گردید، نشان داده شده است. واحد اندازه‌گیری همه ابعاد محفظه بر حسب میلی‌متر می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. برای ارزیابی محفظه رشد و اطمینان از کارکرد صحیح سایر قطعات، میزان دما و رطوبت کارخانه گیاهی خالی از گیاه هر ده دقیقه به مدت ۴۸ ساعت اندازه‌گیری و ذخیره شد.



شکل ۱- طرح سه‌بعدی محفظه رشد

Fig.1. Three-dimensional design of the growth chamber



شکل ۲- طرح دوبعدی محفظه رشد

Fig.2. Two-dimensional design of the growth chamber

در این آزمایش دمای اندازه‌گیری روی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت روی ۶۰ درصد تنظیم شد. حداکثر اختلاف دما و رطوبت برای سنسورها در طی این مدت به‌ترتیب دو درجه سانتی‌گراد و چهار درصد به‌دست آمد.

ماژول اندازه‌گیری دما و رطوبت DHT-11

این سنسور برای اندازه‌گیری دما و رطوبت می‌باشد. دارای مصرف انرژی کم، انتقال سیگنال به مسافت بیش از ۲۰ متر و دارای اندازه‌ی کوچک است. دقت اندازه‌گیری دما ۲± درصد و دقت اندازه‌گیری رطوبت ۵± درصد است. ولتاژ ورودی و خروجی آن ۳ الی ۵ ولت می‌باشد. دمای بین ۲۰- الی ۶۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بین ۵ الی ۹۵ درصد را می‌تواند اندازه‌گیری کند.

ماژول رله

این ماژول زمان روشنایی و خاموشی را کنترل می‌کند از رله ۵ ولت هشت کاناله استفاده شد. این ماژول به گونه‌ای است که پین‌های دیجیتال برد آردینو مستقیما به ورودی کنترل رله وصل می‌شود.

ماژول درایور I2C

در این طراحی از یک ماژول درایور LCD کاراکتری ۲*۱۶ با ارتباط I2C استفاده شد. به کمک این درایور راه‌اندازی LCD بسیار آسان می‌شود و از تعداد پین‌های دیجیتال آردوینو کمتری استفاده می‌شود.

شیلد دیتالاگر

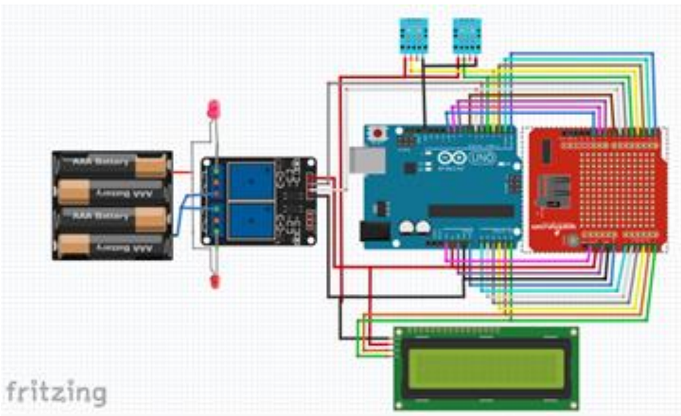
به‌منظور ذخیره داده‌ها و همچنین تنظیم ساعت برای خاموشی و روشنایی از یک شیلد دیتالاگر آردینو استفاده شد. با استفاده از این شیلد می‌توان فایل‌ها را بر روی یک حافظه SD ذخیره کرد. دیتالاگر برای ذخیره داده‌هایی به‌کار می‌رود که بعد از قطع شدن برق، اطلاعات آن از بین نرود.

طراحی و ساخت کنترلر برای کارخانه گیاهی

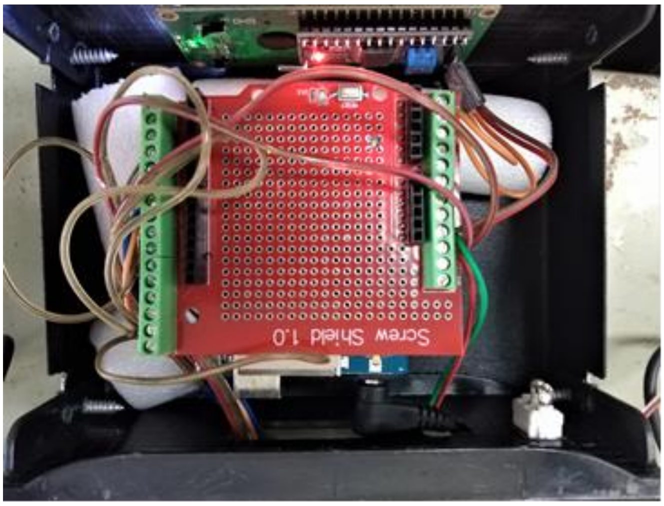
برای کنترل برخی از پارامترها مانند دما، رطوبت و زمان روشن و خاموش شدن لامپ‌های مورد استفاده جهت تولید نور مصنوعی، نیاز به یک کنترلر می‌باشد. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Fritzing کنترلر مورد نظر طراحی شد (شکل ۳) و در ادامه از قطعات و سنسورهای DHT-11 برای اندازه‌گیری رطوبت و دما، برد آردوینو UNO بر پایه ATMEGA328P، ماژول رله، شیلد دیتالاگر و ماژول درایور I2C استفاده شد. همچنین برای نوشتن کدها جهت کنترل پارامترهای مورد نیاز، از محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار آردوینو استفاده شد. شکل ۴ کنترلر استفاده شده در این پژوهش را نشان داده است.

تیمارهای رنگی

برای بررسی تاثیر نورهای مختلف بر گیاه از ۷ تیمار رنگی و از نور خورشید به‌عنوان تیمار شاهد استفاده شد. این تیمارها از طریق تغییر در تعداد سه رنگ قرمز (۶۶۰-۶۱۰ نانومتر)، سبز (۵۵۰-۵۰۰ نانومتر) و آبی (۵۰۰-۴۵۰ نانومتر) به‌وجود آمدند (جدول ۱). طول همه‌ی LEDهای مورد استفاده ۱۰ سانتی‌متر و محدوده پوشش آن‌ها حدود ۳۰ سانتی‌متر بود (شکل ۵).

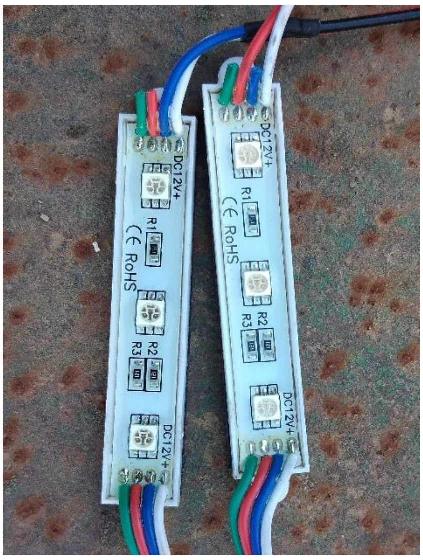


شکل ۳- مدار طراحی‌شده در نرم‌افزار Fritzing
Fig.3. Circuit designed in Fritzing software



شکل ٤- کنترلر مورد استفاده

Fig.4. The controller used



شکل ۵- LEDها برای تولید نور مصنوعی

Fig.5. LEDs to produce artificial light

اجرای آزمایش و تست با گیاه مدل

پس از طراحی و ساخت کارخانه گیاهی کوچک، LEDها نصب شدند. با توجه به پژوهش‌های انجام شده، همه‌ی LEDها در قسمت بالایی هر قفسه قرار گرفت و گیاه در معرض تابش نور مستقیم لامپ‌های مورد استفاده بود. مدت زمان روشنایی و خاموشی به‌ترتیب بر ۱۶ و ۸ ساعت تنظیم شد و شدت نور بر ۱۰۰ ±۳۰۰۰ لوکس تنظیم شد که این مقدار توسط دستگاه لوکس‌متر اندازه‌گیری شد. همچنین برای رسیدن نور به برگ‌های زیرین گیاه، از بازتابنده‌ها (فویل آلومینیومی) در اطراف گیاه استفاده شد. شکل ۶ محل قرارگیری LEDها را نشان داده است. دما و رطوبت در طول انجام آزمایش ثابت بود و برای تنظیم آن‌ها از سیستم خنک‌کننده آزمایشگاه استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری دما و رطوبت از دو سنسور استفاده شد که در قفسه‌های اول و سوم و در بالای LEDها نصب شدند. شکل ۷ محل قرارگیری سنسور دما و رطوبت را نشان داده است. پس از نصب سنسورها و سایر قطعات مربوط به کارخانه گیاهی کوچک و تنظیم دمای مورد نظر برای رشد گیاه، بذر گیاه تربچه درون لیوان‌های یکبارمصرف کاشته شد و داخل دستگاه قرار گرفت. همچنین از کوکوپیت و پرلیت به‌عنوان بستر کشت استفاده شد. در ابتدا تنها آب مورد نیاز در اختیار گیاهان قرار گرفت و پس از دو هفته و رشد برگ‌های حقیقی، محلول غذایی رقیق‌شده نیز به‌منظور تغذیه

گیاهان استفاده شد. پس از گذشت پنج هفته اقدام به برداشت تربچه‌ها شد و در آون با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. همچنین طول گیاه (طول اندام رویشی) در سه مرحله زمانی اندزه‌گیری شد. سپس پارامترهای مختلف مانند وزن تر و خشک، قند و همچنین رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید) اندازه‌گیری گردید.

جدول ۱- نسبت لامپ‌های LED به‌کار رفته در این آزمایش

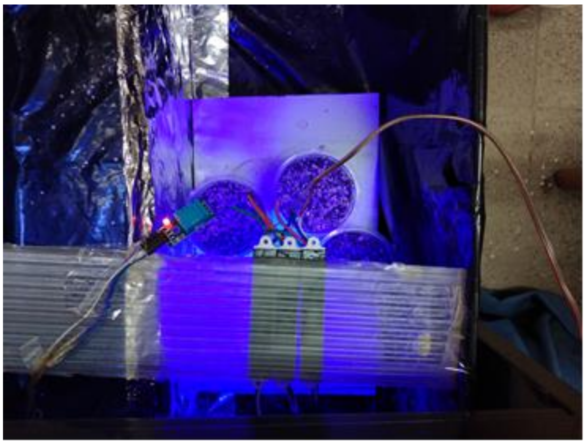
Table 1- The ratio of LED lamps used in this experiment

تیمارها **Treatments**	قرمز **Red**	سبز **Green**	آبی **Blue**
تیمار ۱ Treatment 1	2	0	1
تیمار ۲ Treatment 2	2	1	0
تیمار ۳ Treatment 3	1	0	2
تیمار ۴ Treatment 4	0	1	2
تیمار ۵ Treatment 5	1	1	1
تیمار ۶ Treatment 6	0	0	1
تیمار ۷ Treatment 7	1	0	0
تیمار ۸ Treatment 8	شاهد (نور طبیعی محیط) Control (natural ambient light)		



شکل ٦- محل قرارگیری LEDهای تولیدکننده نور مصنوعی

Fig.6. Location of LEDs producing artificial light



شکل ۷– محل قرارگیری سنسور دما و رطوبت

Fig.7. Location of temperature and humidity sensor

اندازه‌گیری قند گیاه

پس از خشک کردن گیاه تربچه، نمونه‌ها با ۵ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد مخلوط شد و به مدت ۱۰ دقیقه درون حمام آب گرم در دمای ۷۰ درجه قرار گرفت. سپس محلول ساخته‌شده در دستگاه سانتریفیوژ با چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شد. این فرآیند چهار بار تکرار و در ادامه محلول آنترون ساخته شد و مقدار ۱۵۰ میلی‌گرم آنترون در ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک رقیق حل شد. سپس جهت اندازه‌گیری قند محلول، مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره گیاه تربچه در لوله آزمایش ریخته شد و ۳ میلی‌لیتر محلول آنترون به آن اضافه گردید. مخلوط به‌دست آمده به مدت ۲۰ دقیقه در درجه حرارت ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در حمام آب جوش قرار گرفت. در نهایت جذب عصاره در طول موج ۶۲۰ نانومتر توسط اسپکتوفتومتر خوانده شد و با استفاده از رابطه (۱) مقدار قند برحسب میکروگرم بر گرم وزن خشک گیاه به‌دست آمد (McCready, Guggolz, Silviera, & Owens, 1950).

$$\text{مقدار قند} = \left(\frac{\text{میزان جذب} - 0.304}{0.01242}\right) \times \text{وزن خشک} \qquad (۱)$$

اندازه‌گیری رنگیزه‌های فتوسنتزی

جهت عصاره‌گیری رنگیزه‌ها، از حلال متانول استفاده شد و جذب عصاره متانولی به‌دست آمده در طول موج‌های ۶۶۵/۲، ۶۵۲/۴ و ۴۷۰ نانومتر خوانده شد و محاسبات لازم با استفاده از روابط (۲) تا (۴) انجام گرفت (Lichtenthaler & Buschmann, 2001). در این روابط، C_a کلروفیل a، C_b کلروفیل b و $C_{(X+C)}$ کارتنوئیدها (گزانتوفیل+کاروتن) می‌باشد.

$$C_a\ (\mu g.ml^{-1}) = 16.72\ A_{665.2} - 9.16\ A_{652.4} \qquad (۲)$$

$$C_b\ (\mu g.ml^{-1}) = 34.09\ A_{652.4} - 15.28\ A_{665.2} \qquad (۳)$$

$$C_{(x+c)}\ (\mu g.ml^{-1}) = (1000\ A_{470} - 1.63\ C_a - 104.96\ C_b)/221 \qquad (۴)$$

طرح آماری مورد استفاده

در این پژوهش از نور مصنوعی تولیدشده با استفاده از LED با هفت ترکیب طیف نوری و از نور خورشید به‌عنوان تیمار شاهد استفاده شد. طرح مورد استفاده، طرح کاملا تصادفی با ۸ تیمار و ۳ تکرار بود و تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS صورت گرفت. مقایسه میانگین‌ها نیز از روش دانکن و در سطح احتمال یک و پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد، تاثیر تیمارهای به‌کار رفته بر تمامی صفات مورد ارزیابی به‌جز طول گیاه، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

با توجه به نتایج به‌دست آمده، تیمار نوری (R2, G0, B1) دارای بیشترین مقدار کلروفیل a بود و اختلاف معنی‌داری با شاهد و سایر تیمارهای دیگر داشت (شکل ۸). کمترین مقدار کلروفیل a نیز مربوط به تیمار (R1, G0, B0) بود که اختلاف معنی‌داری با شاهد و تیمار (R1, G1, B1) نداشت (شکل ۸).

بیشترین مقدار کلروفیل b متعلق به تیمار (R2, G0, B1) بود که با شاهد دارای اختلاف معنی‌دار بود ولی نسبت به تیمارهای (R2, G1, B0) و (R1, G0, B2) تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۹). مشابه آن‌چه در خصوص کلروفیل a بیان شد، کمترین مقدار کلروفیل b نیز مربوط به تیمار (R1, G0, B0) بود که اختلاف معنی‌داری با شاهد و تیمار (R1, G1, B1) نداشت (شکل ۹).

جدول ۲- آنالیز واریانس تاثیر تیمارهای نوری بر زیست‌توده، قند و رنگیزه‌های فتوسنتزی تربچه

Table 2- Analysis of variance of the effect of light diets on biomass, sugar, and photosynthetic pigments of radish

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات Mean of square							
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	کارتنوئید Carotenoid	وزن تر Wet weight	وزن خشک Dry weight	قند Sugar	طول Length
تیمار Treatment	7	0.106**	0.065**	0.328**	718.27**	0.0046**	0.000017**	0.168**	1.13[ns]
خطا Error	16	0.019	0.011	0.057	153.31	0.0006	0.0000015	0.006	0.46
ضریب تغییرات Coefficient of variation	–	22.16	22.54	22.02	22.52	10.61	10.77	22.01	9.13

ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار، ** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

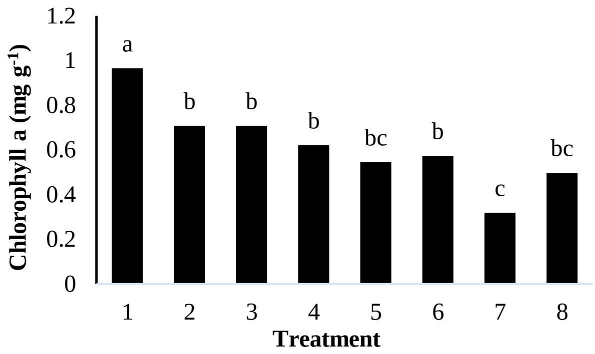
ns No significant difference, ** Significant difference at the level of one percent probability

کلروفیل کل به مجموع دو کلروفیل a و b گفته می‌شود. با توجه به شکل ۱۰ بیشترین میزان کلروفیل کل، مربوط به تیمار (R2, G0, B1) بود که به‌طور معنی‌داری نسبت بـه شـاهد و همـه‌ی تیمارهـای نوری مورد بررسی به‌جز دو تیمار (R2, G1, B0) و (R1, G0, B2)، برتری داشت (شکل ۱۰).

کارتنوئید مجموع رنگیزه‌هایی مانند گزانتوفیل و کاروتن می‌باشـد که نقش آن جمع‌آوری انرژی و استفاده در فتوسنتز اسـت. شـکل ۱۱ مقایسه میانگین کارتنوئید در تیمارهای مختلـف را نشـان داده اسـت. بیشترین مقدار کارتنوئید مربوط به تیمار (R2, G1, B0) بـود کـه بـا تیمارهای شاهد، (R0, G0, B1)، (R1, G0, B0) و (R1, G1, B1) اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد داشت (شکل ۱۱).

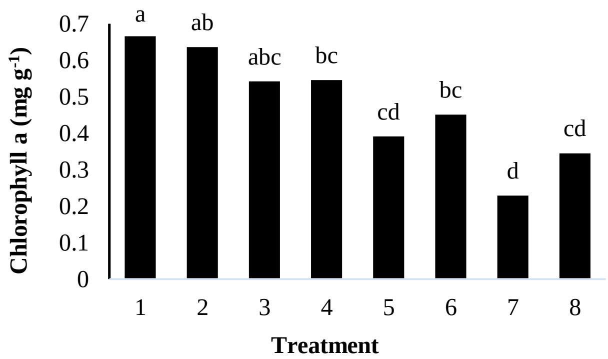
نتایج این بخش نشان داد که تیمـار نـوری ترکیـب قرمـز و آبـی به‌ویژه زمانی‌که نور قرمز بیشتر باشد، دارای رنگیـزه‌هـای فتوسـنتزی بالاتری است. برعکس اگر تنها از یـک طیـف نـوری آبـی یـا قرمـز استفاده شود و یا نسبت نوری مساوی قرمز، سبز و آبی اعمـال شـود، وضعیت رنگیزه‌های فتوسنتزی و به تبـع آن میـزان فتوسـنتز کـاهش خواهد یافت. زیرا توسعه روزنه (روزنه‌هایی بر روی گیاه که بـا جـذب دی‌اکسیدکربن امکان فتوسنتز را برای گیاه فراهم می‌کند) گیاه در نور تک‌رنگ نسبت به نور مخلوط کمتر است. نور آبـی و قرمـز بیشـترین تاثیر را در فرآیند فتوسنتز دارند و نور آبی دارای قدرت نفـوذ بیشـتری در بافت‌های گیاه نسبت به نـور قرمـز دارد و مـی‌بایسـت بـه نسـبت منطقی از نور آبی بهره برد و برای رشد بیشتر نیاز به حجم نـور قرمـز بیشتری است. همچنین کلروفیل بیشتر نور سبز جذب نمی‌کند و آن را بازتاب می‌کند. براساس برتری تیمار (R2, G0, B1)، از نظر همـه‌ی رنگیزه‌های فتوسـنتزی مـی‌تـوان نتیجـه گرفـت، ایـن تیمـار نـوری مطلوب‌ترین تیمار برای رنگیزه‌های فتوسنتزی اسـت. نتـایج پـژوهش (Shimizu *et al.*, 2011) نیز نشان داد که ترکیب نور قرمز و آبی در افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی نقش موثری دارد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده (شکل ۱۲)، بیشترین مقدار وزن تر مربوط به تیمار (R2 ،G0 ،B1) بود کـه اخـتلاف معنـی‌داری بـا نـور طبیعـی و تیمارهـای (R1 ،G0 ،B2) و (R1 ،G1 ،B1) نداشـت. کمترین وزن تر نیز در تیمـار نـوری صـرفا قرمـز بـه‌دسـت آمـد کـه به‌طورمعنی‌داری از تمامی تیمارها پایین‌تر بود (شکل ۱۲). بـر اسـاس نتایج به‌دست آمده، وزن خشک گیاه تربچه بین ۴ الـی ۶ درصـد وزن تر گیاه بود. در وزن خشک نیـز ماننـد وزن تـر بیشـترین میـزان وزن خشک مربوط به تیمار (R2 ،G0 ،B1) بود که اختلاف معنـی‌داری بـا سایر تیمارها به‌جز (R0 ،G1 ،B2) و (R1 ،G0 ،B0) نداشت (شـکل ۱۳). نتایج نشان داد که طیف نوری قرمز به تنهایی نمی‌تواند شـرایط لازم برای رشد و در نهایت حصول عملکـرد مطلـوب گیـاه را فـراهم نماید. در هنگام استفاده از یک طیف نوری، نور آبـی شـرایط بهتـری نسبت به نور قرمز برای رشد گیاه فراهم نمود. این نتیجـه عـلاوه بـر زیست‌توده، درخصوص رنگیزه‌های فتوسنتزی نیز صادق بـود و طیـف آبی نسبت به طیف قرمز شرایط بهتری را برای فتوسنتز گیـاه فـراهم کرد.



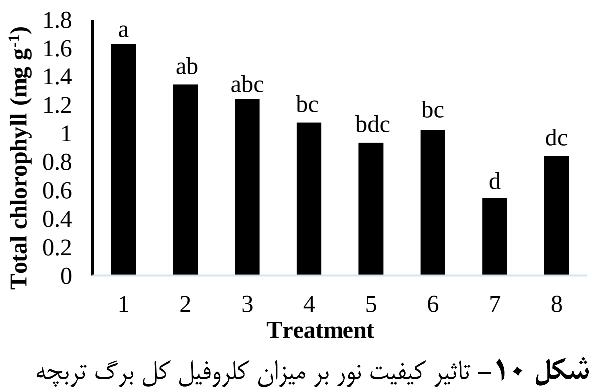
شکل ۸- تاثیر کیفیت نور بر میزان کلروفیل a برگ تربچه

Fig.8. The effect of light quality on the amount of chlorophyll a in radish leaves



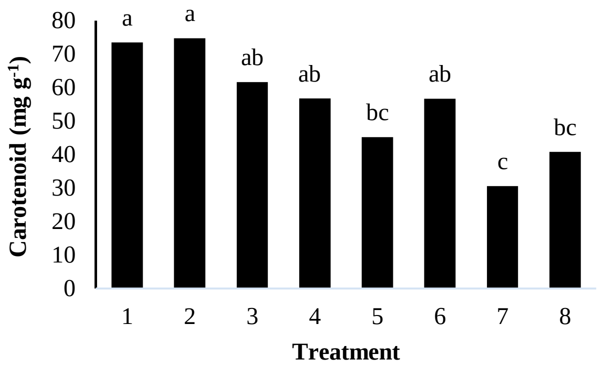
شکل ۹- تاثیر کیفیت نور بر میزان کلروفیل b برگ تربچه

Fig.9. The effect of light quality on the amount of chlorophyll b in radish leaves



شکل ۱۰- تاثیر کیفیت نور بر میزان کلروفیل کل برگ تربچه

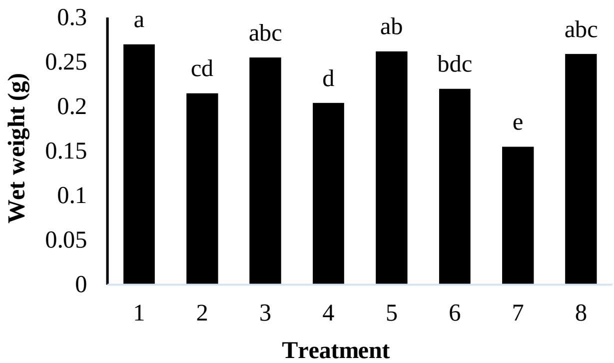
Fig.10. The effect of light quality on the amount of total chlorophyll in radish leaves



شکل ۱۱- تاثیر کیفیت نور بر میزان کارتنوئید برگ تربچه

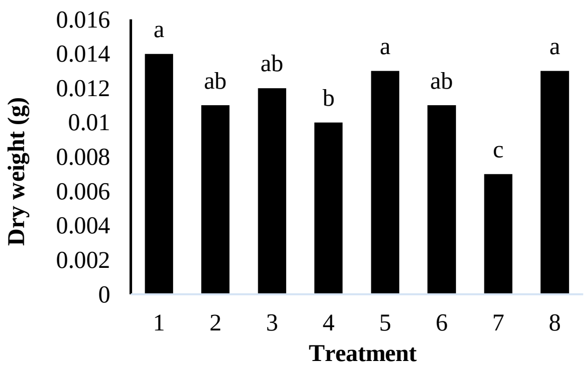
Fig.11. The effect of light quality on the amount of carotenoid in radish leaves

شکل ۱۴ نتایج مقایسه میانگین بین قند گیاه در تیمارهای مختلف را نشان داده است. بیشترین میزان قند گیاه مربوط به تیمار (R2 ،G0 ،B1) بود که به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد، نور طبیعی و سایر تیمارهای نوری به‌کار رفته برتری داشت. از آنجا که تولید کربوهیدرات‌ها و قند ارتباطی مستقیم با کارایی فتوسنتزی دارد لذا می‌توان گفت که در تیمار (R2 ،G0 ،B1) وضعیت فتوسنتز نسبت به سایر تیمارهای مورد بررسی وضعیت بهتری داشته است.



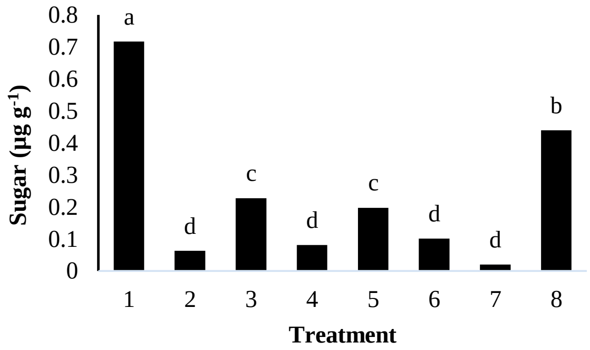
شکل ۱۲- تاثیر کیفیت نور بر میزان وزن تر برگ تربچه

Fig.12. The effect of light quality on the fresh weight of radish leaves



شکل ۱۳- تاثیر کیفیت نور بر میزان وزن خشک برگ تربچه

Fig.13. The effect of light quality on the dry weight of radish leaves

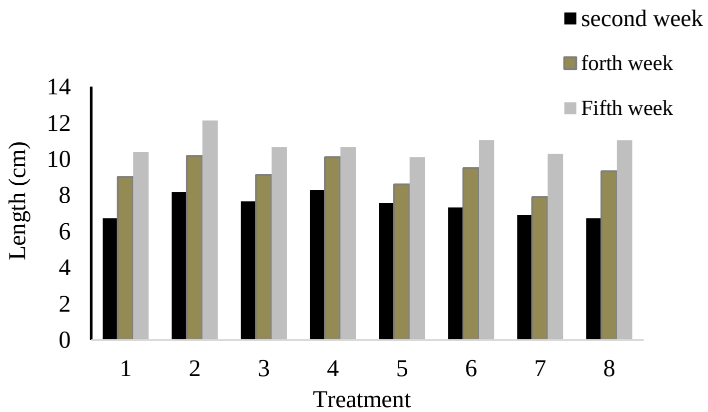


شکل ۱٤- تاثیر کیفیت نور بر میزان قند برگ تربچه

Fig.14. The effect of light quality on the sugar content of radish leaves

در پژوهشی که به‌منظور بررسی اثر طیف‌های مختلف نوری بر گیاه کاهو انجام شد، نتایج نشان داد که ترکیب نور قرمز و آبی، کارایی فتوسنتزی بالاتری نسبت به طیف‌های نوری مورد آزمایش داشت (Shimizu *et al*., 2011). همراستایی میزان بالای قند و میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی نیز نشان داد که در تیمار (B1، G0، R2) شرایط مناسب‌تری برای جذب نور و انجام فتوسنتز نسبت به سایر تیمارهای نوری وجود دارد.

طول گیاه در سه مقطع زمانی اندازه‌گیری و نتایج در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲، اختلاف معنی‌داری بین تیمارها از نظر طول گیاه وجود نداشت. نتایج ارزیابی طول گیاه در تیمارهای مختلف نشان داد که اگر شدت نور مناسبی انتخاب گردد؛ لامپ‌های LED عارضه کشیدگی (legginess) در مقایسه با نور طبیعی ایجاد نمی‌کنند. در اختلال کشیدگی، ساقه گیاه طویل شده ولی ضعیف و دارای کیفیت پایین است (Javanmardi, 2010). نور مصنوعی در صورتی‌که به‌درستی تنظیم نشود ممکن است عارضه کشیدگی را تشدید نماید.



شکل ۱۵- تاثیر کیفیت نور بر طول گیاه در سه مقطع زمانی

Fig.15. The effect of light quality on plant length in three time periods

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که اگر محدودیتی از نظر نور طبیعی در فضاهایی مانند گلخانه و کشت‌های طبقاتی و همچنین کارخانه‌های گیاهی ایجاد شود، می‌توان نور مصنوعی حاصل از لامپ‌های LED در کیفیت بهینه‌شده را جایگزین نور طبیعی نمود. بررسی اثر تیمارهای مختلف نوری بر برخی از خصوصیات گیاه تربچه نشان داد که ترکیب نور قرمز و آبی در صورتی‌که شدت نور قرمز نسبت به نور آبی بیشتر باشد، می‌توانـد در مقایسه با دیگر تیمارها شرایط بهتری را برای گیاه فراهم نماید، زیرا گیاه می‌توانـد همه‌ی انرژی موجود در نورهای قرمز و آبی را جذب کند. دلیل بیشتر بودن شدت نور قرمز این است که، نور قرمز دارای قدرت نفوذ کمتری نسبت به نور آبی است به همین دلیل، برای آن‌که بتواند به بافت‌های گیاه نفوذ کند باید شدت آن را افزایش داد. ترکیب نور قرمز و آبی در

افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی، وزن تر و خشک و افزایش قند گیاه نسبت به سایر تیمارها برتری داشت. در مقایسه با تیمارهای مختلف مورد بررسی، استفاده از نور قرمز به‌تنهایی، تاثیر نامطلوبی بر همه شاخص‌های مورد بررسی داشت. نور سبز تاثیر زیادی بر زیست‌توده و پارامترهای فیزیولوژیکی اندازه‌گیری‌شده نداشت؛ لذا حضور آن در ترکیب نوری جهت رشد گیاه ضروری به نظر نمی‌رسد. پژوهش‌های آینده می‌تواند بررسی رژیم‌های نوری دیگر، به‌ویژه رنگ نارنجی و بنفش را در گیاهان متنوع، مورد ارزیابی قرار دهد. همچنین پرداختن به ارزش غذایی و دارویی گیاهان تحت نور مصنوعی می‌تواند از دیدگاه تجاری مهم و ارزشمند باشد.

References

1. Graamans, L., Baeza, E., Dobbelsteen, A.V. D., Tsafaras, I., & Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*, *160*, 31-43. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003
2. Ikeda, A., Tanimura, Y., Ezaki, K., Kawai, Y., Nakayama, S., Iwao, K., & Kageyama, H. (1991). Environmental control and operation monitoring in a plant factory using artificial light. *International Workshop on Sensors in Horticulture*, *304*, 151-158. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1992.304.16
3. Javanmardi, J. (2010). *Scientific and applied basis for vegetable*. University of Mashhad press. (In Persian).
4. Kozai, T. (2007). Propagation, grafting and transplant production in closed systems with artificial lighting for commercialization in Japan. *Propagation of Ornamental Plants*, *7*(3), 145-149.
5. Kozai, T. (2012). Sustainable plant factory: Closed plant production systems with artificial light for high resource use efficiencies and quality produce. International Symposium on Soilless Cultivation 1004: 27-40. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1004.2
6. Kozai, T. (2013a). Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: concept, estimation and application to plant factory. *Japan Academy*, *89*, 447-461. https://doi.org/10.2183/pjab.89.447
7. Kozai, T. (2013b). Plant factory in Japan-current situation and perspectives. *Chronica Horticulturae*, *53*(2), 8-1.
8. Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2019). *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic press.
9. Li, M., Kozai, T., Ohyama, K., Shimamura, S., Gonda, K., & Sekiyama, S. (2012). Estimation of hourly CO_2 assimilation rate of lettuce plants in a closed system with artificial lighting for commercial production. *Ecological Engineering*, *24*(3), 77-83.
10. Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, *1*(1), F4-3. https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01
11. Ohyama, K., Takagaki, M., & Kurasaka, H. (2008). Urban horticulture: its significance to environmental conservation. *Sustainability Science*, *3*(2), 241-247. https://doi.org/10.1007/s11625-008-0054-0
12. McCready, R. M., Guggolz, J., Silviera, V., & Owens, H. S. (1950). Determination of starch and amylose in vegetables. *Analytical Chemistry*, *22*(9), 1156-1158. https://doi.org/10.1021/ac60045a016
13. Shimizu, H., Saito, Y., Nakashima, H., Miyasaka, J., & Ohdoi, K. (2011). Light environment optimization for lettuce growth in plant factory. *IFAC Proceedings Volumes*, *44*(1), 605-609. https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02683
14. Takagaki, M., Hara, H., & Kozai, T. (2014). Indoor horticulture using micro-plant factory for improving quality of life in urban areas: design and a social experiment Approach, IHC 2014, Abstract book.